

Г.Л. ХАВІН, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», м. Харків

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

The order of interaction between cutting tool and reinforced composite material for drilling process is considered. The present-day drilling fracture models of laminate composite materials are presented. The possibility use of different tools and their wearing for drilling are analysed.

Рассмотрен механизм взаимодействия между инструментом и материалом при сверлении полимерных композиционных материалов. Приведены современные модели разрушения слоистых композитов при сверлении. Анализируется возможность применения различных инструментов и их изнашивание в процессе обработки.

Розглянуто механізм взаємодії між інструментом та матеріалом при свердленні полімерних композиційних матеріалів. Надані сучасні моделі руйнування багатшарових композитів при свердленні. Аналізується можливість застосування різних інструментів та їх зношування в процесі обробки.

Свердлення полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є найбільш розповсюдженою операцією їх механічної обробки. У більшості випадків ця операція проводиться твердосплавними або алмазними свердлами. В процесі обробки зношування інструменту і якість отворів значною мірою залежать від марки ПКМ, його армування та інше. Вимоги до якості отворів, як правило, не дуже високі, і відповідають $R_z \geq 20$ мкм.

В силу того, що ПКМ неоднорідні та анізотропні їх свердлення дуже специфічні і, у більшості випадків, супроводжується наявністю пошкоджень навкруги отворів. До дефектів обробки також відносять розшарування між шарами, виривання джгутів або ниток армування, утворення міжшарових тріщин або температурні ушкодження (прижоги) [1]. Наявність цих дефектів впливає не тільки на несучу спроможність, але і на надійність виробу в цілому [2]. Одним з найбільш важливим і впливовішим фактором у появі дефектів є зношування інструменту (свердел) за рахунок абразивної дії твердих складових ПКМ [3].

Ряд авторів [4] після проведення багатьох експериментів по різанню одне спрямованих вугле- та склопластиків прийшли до висновку, що механічна обробка таких матеріалів є послідовність руйнувань, що утворює стружку надлому. При цьому процес руйнування йде практично без будь-яких пластичних деформацій і має крихкий характер.

Для інтенсифікації процесу свердлення та одержання гарантованої якості отворів були запропоновані різні засоби. По-перш усього, ці заходи пов'язані з геометрією інструменту. Так в роботі [5] було запропоновано використати від 3 до 6 ріжучих крайок для того, щоби збільшити довжину контакту між інструментом та матеріалом. Кут між ріжучою крайкою та віссю

інструменту був 118° для головних ріжучих крайок и малий головний передній кут. До то ж поперечна ріжуча крайка повинна бути як можна менш. Рекомендовано попереднє за свердлення для нейтралізації ефекту поперечної крайки.

Другими мірами що можуть привести до зниження розшарування, це комплекс дій по регулюванню подачею. Цей комплекс мір знайшов широке застосування у свердлильних верстатах з ЧПУ. Наприклад у [6] впроваджено метод спіральної подачі, що приводить до зниження розшарування та ворсистості у виробках. Так у [7] запропоновано керування осьовою силою на основі нейронних сітей для мінімізації розшарування шліхом керування подачею. В роботі [2] описано орбітальний метод свердлення, де отвори обробляються уздовж осі і радіально. Цей метод усуває постійний центр інструменту і, таким чином, зменшує осьову силу.

У роботі [2] було розглянуто вплив технологічних параметрів на ріжучий тиск, розшарування та енергію різання в вуглецевих нитках армування. Автори заключили, що подача має дуже великий вплив на осьову силу, кількість та величина ушкоджень збільшується із зростанням подачі. У [9] було проаналізовано вплив підкладки під вироби у процесі свердлення на розшарування багатошарових композитів. Використовувалось свердла двох геометричних конфігурацій – пиловидне та трубчате. Наведені результати показали, що застосування підкладаємої пластини збільшує критичну осьову силу, що дозволяє використовувати більш високу подачі. У іншій роботі [10] автори здійснили серію експериментів для доказу переваг використання спеціального свердла. Базуючись на експериментальному огляді можна зробити висновок, що під тип свердла можна знайти достатньо високу подачу при гарантованій якості обробки отвору. В роботі [11] дослідили зміни величини осьової сили за час свердлення. Було запропоновано математичну модель для обчислення критичної сили для того, щоби здійснювати вибір осьової сили безпосередньо під порогом критичної сили.

Автором [12] були проведені дослідження по впливу наявності попереднього отвору на зменшення розшарування при використанні трубчатих свердел. Попередній отвір виключає ефект поперечної ріжучої крайки і значно зменшує розшарування. Відношення попереднього отвору до діаметру є параметр управління свердленням. Було обґрунтовано оптимальне співвідношення 0,85 для використання найбільш високої подачі 0,012 мм/об.

В роботі [13] автори порівняли дію трьох різних типів свердел: карбід-вольфрамових, нітрид титану та алмазоподібний вуглець, які були з покриттям і без нього. Використання покриття не дало будь-яких суттєвих результатів при обробці вуглець-епоксидного ламінату ні по зниженню дефектів, ні по зносу інструменту.

Заслуговує уваги дослідження, що надані в роботі [14], де авторами було проведено багато експериментів по пошуку такої схеми обробки, що дасть можливість запобігти розшарування (лушінню) на вході в плиту і розпушенню на виході.

Головною проблемою при свердленні шарових композиційних матеріалів є усуення дефектів пов'язаних з розшаруванням (лушінням) матеріалу на вході свердла і витиснення (розшарування) на виході. У рішенні цієї проблеми фундаментальним є формулювання механізму руйнування і побудова його математичної моделі.

Найбільше розповсюдження одержала кількісна модель, що базується на руйнуванні розшаровуванням, яка була запроваджена Hocheng и Dharan [15]. Розглядалися два різних механізми, які відповідають розшаруванню у витисненні на виході і шелушінню на вході. Ця модель пов'язана з визначенням пошкодження шарового матеріалу з параметрами свердлення та властивостями композиційного матеріалу, тобто з критичною силою яка забезпечує початок руху тріщини для виходу і виходу.

Фізичні процеси на вході свердла, тобто при навантаженні, пов'язані з силовою дією інструменту, місцевою контактною взаємодією і контактним руйнуванням, зносом і частковим розігрівом інструменту. Для крихких матеріалів це зародження і зростання радіальних та кільцевих тріщин, їх взаємодія і вихід на вільну поверхню. При подальшому навантаженні матеріал шарів спіральньо закручується, що викликає розшарування, розділ шарів та їх руйнування. Інтенсивність цього явища найбільш сильно залежить від подачі та зношування свердла.

Руйнування на виході свердла є наслідком зародження та зростання міжшарових тріщин. Цей процес визначається фізичними властивостями наповнювача та полімеру і адгезійним зв'язком між ними. Фактично цей дефект є наслідком силової дії (за рахунок осьової сили) інструменту.

Модель Hocheng и Dharan [15] побудована в межах лінійної механіки руйнування. Критична сила руйнування на виході, відповідно цієї моделі має вигляд

$$F_a = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}EH^3}{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

та критична сила різання для початку руйнування на вході

$$F_c = k_{slope} \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}EH^3}{3(1-\nu^2)}} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

де H - товщина слоїстого пластику;

h - недорізана глибина під інструментом;

G_{IC} - критична енергія інтенсивності звільнення тріщини;

E - модуль пружності;

ν - коефіцієнт Пуассона;

k_{slope} - постійна, що визначається величинами λ (кут нахилу вершини свердла) і μ (коефіцієнтом тертя між інструментом і матеріалом, що обробляється).

З іншого боку для сил різання відоме емпіричне співвідношення [16], яке після обробки експериментальних даних має вигляд

$$F = K_1 (sd)^{1-n} + K_2 d^2, \quad (3)$$

$$M = K_3 s^{1-n} d^{2-n}, \quad (4)$$

де F - осьова сила, Н; M - крутний момент, Н·м; d - діаметр свердла, мм; s - подача, мм/об; n , K_1 , K_2 і K_3 - постійні, що необхідно визначити. Зазвичай величина n визначається шляхом застосування теорії розмірності для свердлення, як кут нахилу лінії регресії, що побудована по усім експериментальним точкам, у координатах $\log u - \log(fd)$. Якщо ця величина відома, то величини K_1 , K_2 і K_3 можуть бути визначені графічно з експериментальних даних. Наприклад такі дані з роботи [17] надані у табл.1 для вуглецевого пластику на епоксидному в'язучому.

За допомогою формул (3),(4) були підраховані осьова сила та крутний момент для подачі $s=0,1$ мм/об, та свердла діаметром 9,5 мм, для яких наведені експериментальні дані у роботі [18]. Значення, обчислені за цими формулами, дорівнюють $F=7,276$ Н та $M=0,061$ Н·м.

Таблиця 1 - Величини n , K_1 , K_2 і K_3 , що визначені графічно

Параметр	n	K_1	K_2	K_3
Величина	0,3406	40,77	-0,3561	0,0066

Ці величини були підраховані за формулами з роботи [19]:

$$F = C_p \cdot D^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot K_p,$$

$$K_p = K_{ph} \cdot K_{p\phi} \cdot K_{p\alpha} \cdot K_{p\gamma} = 1,$$

$$M = C_m \cdot D^{x_m} \cdot s^{y_m} \cdot K_m,$$

$$K_m = K_{hm} \cdot K_{\phi m} = 1,$$

де для вуглепластику $C_p = 79,8$, $x_p = 1,02$, $y_p = 0,85$, $C_m = 21 \cdot 10^{-2}$, $x_m = 1,55$, $y_m = 0,97$;

$$F = 79,8 \cdot 9,5^{1,02} \cdot 0,1^{0,85} = 112 \text{ Н},$$

$$M = 19,8 \cdot 10^{-2} \cdot 9,5^{1,55} \cdot 0,1^{0,97} = 0,695 \text{ , Н}\cdot\text{м.}$$

Порівняння значень цих величин має місце різниця у 10-15 разів, що наводить на думку про непридатність для реальних розрахунків обох формул.

При свердленні ПКМ необхідно виконувати ряд вимог, що визначаються особливостями обробки цих матеріалів: ні в якому разі не допускається наявність прижогів обробленої поверхні; зношування інструменту здійснюється по задній поверхні і у кутах, і не повинно перевищувати характерну величину для обробки даного матеріалу заданим інструментом (від 0,1 мм до 0,15 мм); якщо сколювання та відшарування крайок отворів припускається, то у загальному випадку воно не повинно перевищувати 0,5 мм; після свердлення отворів має місце усадка, тобто зменшення його діаметру.

Роботу виконано за проектом М2307, що фінансується міністерством освіти та науки України.

Список літератури: 1. Wern C.W., Ramulu M., Shukla A., Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fibre-Reinforced Plastics // *Experimental Mechanics*, 1994. - pp 33 – 41. 2. Persson E., Eriksson I., Zackrisson L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates // *Composites*, 1997. - A, 28. - pp 141-151. 3. Abrate S. Machining of Composite Materials // *Composites Engineering Handbook* / P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, 1997. - pp 777 - 809. 4. Koplev A., Lystrup A., Vorm T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP // *Composites*, 1983. – 14. pp 371-376. 5. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills / Piquet R., Ferret B., Lachaud F. and Swider P. // *Composites*, 2000.-A, 31. - pp 1107-1115. 6. Park K.Y., Choi J.H., Lee D.G. Delamination free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics // *J. of Composite Materials*, 1995. -29. - pp 1988-2002. 7. Stone R., Krishnamurthy K.A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites // *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 1996. - 36.- pp 985-1003. 8. Davim J.P. and Reis P. Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study // *Materials and design*, 2003.-24. - pp 315-324. 9. Tsao C.C., Hocheng H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 2005 -45. - pp 1261-1270. 10. Hocheng H., Tsao C.C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 2006.- 46. - pp 1403-1416. 11. Fernandes M., Cook C. // Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part II: Empirical modelling of maximum thrust force // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 2006. – 46. – pp. 76-79. 12. Tsao C.C. The effect of pilot hole on delamination when core drilling composite materials // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 2006. – 46. - pp 1653-1661. 13. Murphy C., Byrne G., Gilchrist, M. D. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials / *Proc Instn Mech Engrs*, 2001. – 216, Part B. – pp.143-152. 14. Dharan C.H.K., Won M.S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates // *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2000.-39. – pp. 415-426. 15. Hocheng H., Dharan C.K.H. Delamination during drilling in composite Laminates // *J. of Engineering for Industry*, 1995. -112. – pp. 236-239. 16. C. K. H. Dharan, M. Tomizuka, M. S. Won, M. Ozaki, and Y. Sheng, "Integration of Machine Control Schemes in the Machining of Composite Materials," 3rd Intl. Conf. on Integrated Design & Process Tech., ASME Engg. Syst. Design & Analysis Conference, Berlin, Germany, pp.294-301, 1998. 17. Drilling of Composite Materials // Online version of Wollongong University, 2004. 18. Буловский П.И., Петрова Н.А. Механическая обработка стеклопластиков. – Л.: Машиностроение, 1969.- 152 с. 19. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.- 176 с.

Надійшло до редколегії 15 .03.2010 р.